

УДК 669.539.382:669.17

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ 100-МЕТРОВЫХ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ЗАКАЛЕННЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*

Юрьев А.А.¹, инженер-исследователь УНИ (ant-yurev@yandex.ru)

Громов В.Е.², д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Морозов К.В.¹, к.т.н., начальник прокатного производства (morozov_kv75@mail.ru)

Перегудов О.А.³, помощник ректора по молодежной политике (olegomgtu@mail.ru)

¹ АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

² Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³ Омский государственный технический университет

(644050, Россия, Омск, пр. Мира, 11)

Аннотация. Методами оптической и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии изучена эволюция структурно-фазовых состояний поверхностных слоев головки дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 на глубину до 10 мм по выкружке после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». Показано, что в исходном состоянии в головке рельсов присутствуют следующие структурные составляющие: зерна пластинчатого перлита (относительное содержание 0,7), зерна феррито-карбидной смеси (0,25), зерна структурно свободного феррита. После пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто такое состояние сохраняется лишь на глубине свыше 10 мм. Отличительной особенностью структуры на этом расстоянии является большое количество изгибных экстинкционных контуров, что указывает на упругопластические искажения кристаллической решетки материала. Концентраторами напряжений исследуемой стали являются внутрифазные и межфазные границы раздела зерен феррита и перлита, пластин цементита и феррита колоний перлита, частиц глобулярного цементита и феррита. Преобразование структуры проявляется на макроуровне в формировании микротрещин, проходящих под острым углом к поверхности на глубину до 140 мкм, и в формировании обезуглероженного слоя. На микроуровне выявлено формирование упругопластических полей напряжений и разрушение пластин цементита перлитных колоний. Показано, что концентраторами напряжений являются внутри- и межфазные границы раздела зерен феррита и перлита, пластин цементита и феррита колоний феррита, частиц глобулярного цементита и феррита. В зернах структурно свободного феррита отмечено образование наноразмерных частиц цементита. Проведено сравнение с результатами эволюции структурно-фазовых состояний по выкружке объемно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 500 млн. т брутто: наиболее существенные преобразования структурно-фазовых состояний наблюдаются в поверхностных слоях. Эволюция структурно-фазового состояния перлита пластинчатой морфологии заключается в растворении пластин цементита, что приводит к формированию на месте пластины цементита цепочки частиц карбидной фазы глобулярной формы. Это возможно вследствие ухода атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации.

Ключевые слова: дифференцированно закаленные рельсы, структура, фазовый состав, длительная эксплуатация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-826-830

Вместо объемной закалки в масле и отпуска, до недавнего времени применяемых в качестве основного вида термоупрочнения 25-метровых рельсов, в настоящее время используется дифференцированная закалка сжатым воздухом, что обеспечивает оптимальный уровень твердости и эксплуатационных свойств 100-метровых рельсов [1]. Рассмотрение поведения рельсов при длительной эксплуатации и анализ причин их изъятия вызывает в последнее время большой инте-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 15-12-00010.

Исследования выполнены д.ф.-м.н., профессором Ю.Ф. Ивановым на оборудовании Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск).

Благодарим Е.В. Полевого за предоставленные образцы и анализ макроструктуры.

рес. Необходимость в накоплении информации в этой области связана как со стремлением к более глубокому пониманию фундаментальных проблем физического материаловедения, так и с практической значимостью, диктуемой непрерывным возрастанием требований к надежности рельсов в современных условиях больших нагрузок на ось и высоких скоростей движения. Вполне очевидно, что при интенсивных деформационных воздействиях, реализуемых при длительной эксплуатации, могут происходить различные процессы (рекристаллизационные, релаксационные, фазовые переходы, распад и образование фаз, аморфизация и т.д.), приводящие к эволюции структурно-фазовых состояний, сопровождающейся изменением (ухудшением) механических свойств [2 – 8]. Уже при сравнительно небольшой на-

работке 100 – 500 млн. т пропущенного тоннажа в поверхностных слоях формируются структурно-фазовые состояния с аномально высокой микротвердостью.

При такой поверхностной интенсивной пластической деформации пластины цементита либо изогнуты, либо разрушены, на межфазных границах отмечается крайне высокая плотность дислокаций; наблюдается растворение цементита и образование аустенита за счет обратного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения [6 – 8]. Понимание процессов, протекающих при этом в стали, является одним из неперемных условий управления состоянием материала, что позволяет прогнозировать эксплуатационные возможности рельсов. Поэтому выявление природы и закономерностей эволюции структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в головке рельсов при длительной эксплуатации приобретает особую актуальность.

Целью настоящей работы является сравнительный послойный анализ эволюции структуры, фазового состава поверхности выкружки дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации.

В качестве материала исследования использовали образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ, изготовленные на АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» после наработки 691,8 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

Химический состав материала рельсов удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 для стали марки Э76ХФ. Макроструктуру металла рельсов выявляли в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2013 на полнопрофильном темплете, вырезанном из рельсов в поперечном направлении, после травления в 50 %-ном водном растворе соляной кислоты. Исследование микроструктуры проводили после электролитического полирования поверхности микрошлифа в 5 %-ном уксусном растворе хлорной кислоты с последующим травлением в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследование фазового состава и дефектной субструктуры рельсов осуществляли методами дифракционной электронной микроскопии [9 – 15]. Фольги для исследования изготавливали методами электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом из области выкружки на расстоянии 2 и 10 мм, а также вблизи поверхности выкружки (рис. 1).

Методами металлографии установлено, что на травленных шлифах с поверхности рабочей выкружки наблюдается значительно деформированная структура на глубину до 200 мкм, величина обезуглероженного слоя с поверхности по сплошной сетке феррита не превышает 0,25 мм. В исходном состоянии (до эксплуатации) по морфологическому признаку методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг были выделены следующие структурные составляющие: перлит пластинчатый, зерна феррито-карбидной смеси, зер-

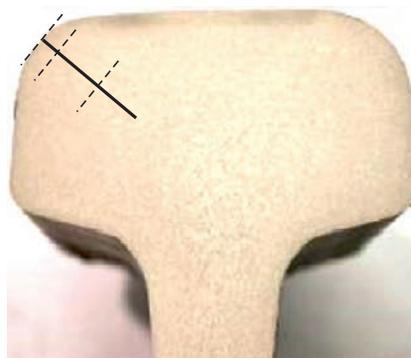


Рис. 1. Схема препарирования образца рельса при исследовании его структуры методами электронной дифракционной микроскопии (сплошной линией показано направление по выкружке; пунктирные линии указывают места расположения слоев металла, использованных для приготовления фольг)

Fig. 1. Scheme of preparation of a rail sample when studying its structure by the methods of electron diffraction microscopy (solid line shows the direction of the fillet, dashed lines indicate the locations of the layers of metal used for the preparation of foils)

на структурно свободного феррита. Основным типом структуры исследуемой стали являются зерна пластинчатого перлита, относительное содержание которых в материале 0,7; относительное содержание зерен феррито-карбидной смеси – 0,25; остальное – зерна структурно свободного феррита.

После пропущенного тоннажа 691,8 млн. т такое состояние сохраняется лишь на глубине 10 мм от поверхности выкружки. Отличительной особенностью структуры на этом расстоянии является большое количество изгибных экстинкционных контуров, что указывает на упругопластические искажения кристаллической решетки материала, вызванные интенсивным механическим воздействием на металл рельсов в процессе эксплуатации.

Концентраторами напряжений исследуемой стали являются внутрифазные и межфазные границы: 1 – раздела зерен феррита и перлита (рис. 2, а); 2 – пластин цементита и феррита колоний перлита (рис. 2, б, в); 3 – частиц глобулярного цементита и феррита (рис. 2, г).

Множественные изменения структуры металла рельсов наблюдаются на разных масштабных уровнях [16]. На макроуровне это проявляется в формировании сетки мелких трещин контактно-усталостного происхождения, выявляемых на поверхности катания головки рельса после травления. По месту дефектов контактно-усталостного происхождения наблюдаются нарушения сплошности, заполненные продуктами коррозии, проходящие под острым углом к поверхности на глубину до 140 мкм. Расстояние между дефектами составляет 700 – 1100 мкм (рис. 3, а). Выявленное на травленных шлифах обезуглероживание поверхностного слоя выкружки на глубину до 250 мкм (рис. 3, б) обнаруживается и при исследовании методами просвечивающей электронной микроскопии.

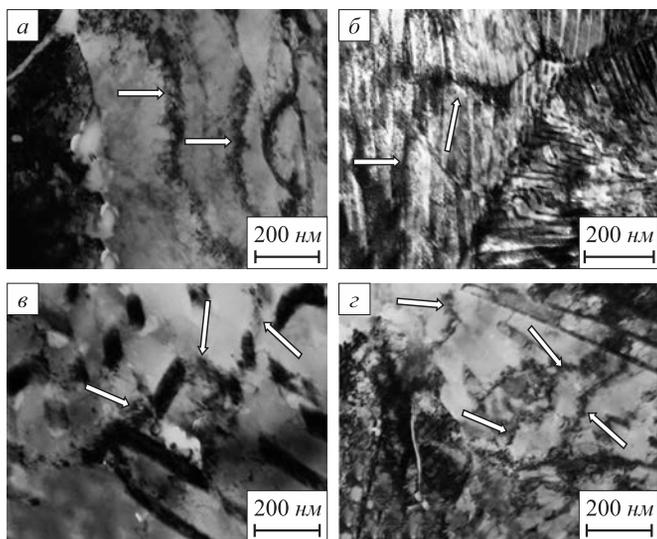


Рис. 2. Изгибные экстинкционные контуры (указаны стрелками) в зернах феррита (*a*), пластинчатого перлита (*б, в*) и феррито-карбидной смеси (*г*)

Fig. 2. Flexural extinction contours (indicated by arrows) in the grains of ferrite (*a*), lamellar pearlite (*б, в*) and ferrite-carbide mixture (*г*)

На рис. 4 показано изображение пластин цементита перлитной колонии, расположенных в поверхностном слое выкружки головки рельса после эксплуатации. Исследования, выполненные методами темнопольного анализа, показывают, что эксплуатация сопровождается дроблением пластин цементита с последующим их разрушением. Рефлексы карбидной фазы на микроэлектроннограмме, полученной с таких пластин, имеют

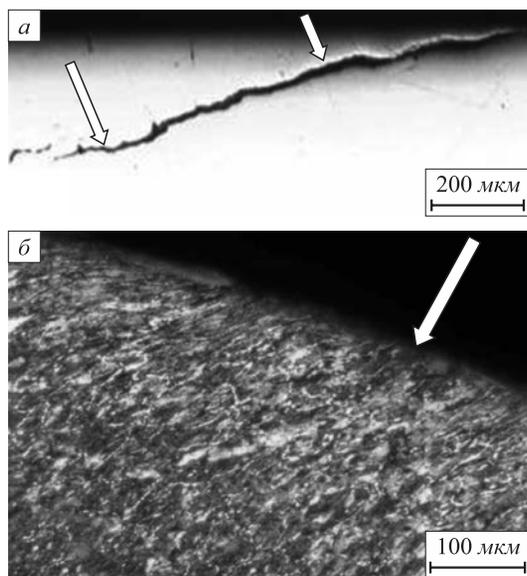


Рис. 3. Микроструктура металла выкружки после испытаний: *a* – микротрещины (указаны стрелками), нетравленный шлиф; *б* – травленный шлиф (стрелкой указана поверхность выкружки)

Fig. 3. Microstructure of the fillet metal after the tests: *a* – microcracks (indicated by arrows), unetched thin section; *б* – etched thin section (the arrow indicates the surface of the fillet)

как радиальное, так и азимутальное размытие, что может свидетельствовать о высоком уровне дефектности кристаллической решетки цементита, а также изменении параметра кристаллической решетки вследствие ухода атомов углерода.

Для объемно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 500 млн. т брутто наиболее существенные преобразования структурно-фазовых состояний наблюдаются в поверхностных слоях [17 – 20]. Эволюция структурно-фазового состояния перлита пластинчатой морфологии заключается в растворении пластин цементита. Это приводит к формированию на месте пластины цементита цепочки частиц карбидной фазы глобулярной формы, что возможно вследствие ухода атомов углерода из кристаллической решетки цементита на дислокации. Вторым этапом данного преобразования является формирование наноразмерных частиц карбидной фазы в ферритных прослойках перлитной колонии. Эволюция структурно-фазового состояния зерен феррито-карбидной смеси сопровождается формированием фрагментированной субструктуры с размерами фрагментов (субзерен) 250 – 300 нм. В объеме и вдоль границ фрагментов располагаются частицы второй фазы. Судя по микроэлектроннограммам, частицами второй фазы являются карбиды железа; в отдельных случаях выявляются рефлексы оксидов железа.

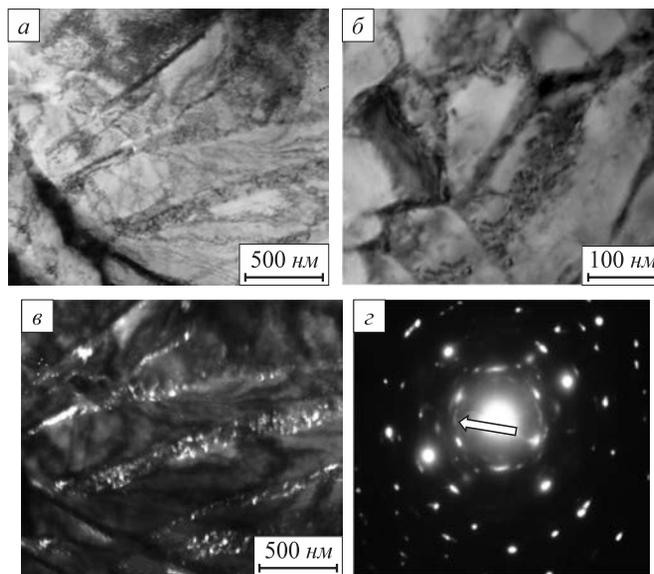


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя металла выкружки головки рельса после эксплуатации:

a, б – светлопольное изображение; *в* – темное поле, полученное в рефлексе $[130] \text{Fe}_3\text{C}$; *г* – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле поз. *в*)

Fig. 4. Electron microscopic image of the metal surface structure in the fillet of the rail head after being in operation: *a, б* – bright-field image; *в* – dark field obtained in the reflex $[130] \text{Fe}_3\text{C}$; *г* – microelectronogram (arrow indicates the reflex in which a dark field *в* is obtained)

На глубине 2 мм эксплуатация рельсов привела к существенному преобразованию субструктуры. Во-первых, в 1,5 – 2,0 раза повысилась скалярная плотность дислокаций, расположенных в объеме ферритной составляющей материала. Во-вторых, фиксируется фрагментация и разрушение цементита пластинчатой морфологии. В-третьих, наблюдается формирование в ферритной составляющей стали наноразмерных частиц карбидной фазы. Наноразмерные частицы выявляются и в зернах перлита, и в зернах феррито-карбидной смеси, и в зернах структурно свободного феррита. Этот факт указывает на протекание в стали при эксплуатации многоступенчатого процесса: растворение частиц цементита исходного состояния, переход атомов углерода на дислокации (в атмосферы Коттрелла и ядра дислокаций), перенос дислокациями атомов углерода в объем ферритных зерен или ферритных прослоек, повторное выделение атомов углерода с образованием наноразмерных частиц цементита округлой формы.

Выводы. Методами оптической и электронной дифракционной микроскопии проведены исследования фазового состава, макро- и микродефектной структуры металла выкружки дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». Показано, что эксплуатация рельсов сопровождается множественным преобразованием структуры стали. На макроуровне это проявляется в формировании микротрещин, проходящих под острым углом к поверхности на глубину до 140 мкм, и в формировании обезуглероженного слоя; на микроуровне – в формировании упругопластических полей напряжений и разрушении пластин цементита перлитных колоний. Проведено сравнение с результатами эволюции структурно-фазовых состояний по выкружке объемно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 500 млн. т брутто.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Microstructure of gradient rails. Carbide / V.E. Gromov, A.B. Yuriyev, K.V. Morozov, Y.F. Ivanov. – CISP Ltd, 2016. – 153 p.
2. Sheinman E. Wear of Rails // J. of Friction and Wear. 2012. Vol. 33. No. 4. P. 308 – 314.
3. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels // Steel Tech. 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19 – 23.
4. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 1659 – 1669.
5. Ning Jiang-Li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva I., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kübel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // Mater. Sci. Eng. A. 2013. Vol. 581. P. 8 – 15.
6. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlite steel due to plastic deformation // Mater. Sci. Eng. A. 2003. Vol. 345. P. 81 – 89.
7. Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // Acta Mater. 2011. Vol. 59. P. 3965 – 3977.
8. Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // Scripta Mater. 2001. Vol. 45. P. 1469 – 1472.
9. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
10. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
11. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
12. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
13. Ray F. Egerton. Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. – Berlin: Springer Science+Business Media, Inc, 2005. – 211 p.
14. The Transmission Electron Microscope / Ed. Maaz Khan. – ITAvE, 2016. – 391 p.
15. C. Barry Carter, David B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
16. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
17. Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsarava K.V., Semina O.A. Surface layer structure degradation of rails in prolonged operation // Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2015. – Vol. 9. No. 6. P. 1292 – 1298.
18. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Peregudov O.A., Morozov K.V., Wang X.L., Dai W.B., Ponomareva Yu.V., Semina O.A. Evolution of structure and properties of railhead fillet in long-term operation // Materials and Electronics Engineering. 2015. Vol. 2. No. 4. P. 1 – 4.
19. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Semina O.A. Long-term operation of rail steel: degradation of structure and properties of surface layer // Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neytron techniques. 2016. Vol. 10. No. 5. P. 1101 – 1105.
20. Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Gromov V.E. Degradation of rail-steel structure and properties of the surface layer // Steel in translation. 2016. Vol. 46. No. 8. P. 567 – 570.

Поступила 25 мая 2017 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 10, pp. 826–830.

CHANGES IN STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF THE SURFACE OF DIFFERENTIALLY HARDENED 100-METER RAILS IN OPERATION

A.A. Yur'ev¹, V.E. Gromov², K.V. Morozov¹, O.A. Peregudov³

¹ JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Russia

² Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

³ Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. By the methods of optical and transmission electron diffraction microscopy the evolution of structural-phase states of the surface layers in the head of differentially hardened rails of category DT350 was studied to the depth up to 10 mm in the fillet after the passed tonnage of 691.8 million gross tones on the experimental ring of JSC “VNIIZhT”. It is shown that in the initial state the following structural constituents

present in the rail head: grains of lamellar perlite (relative content is 0.7), grains of ferrite-carbide mixture (0.25) and grains of structurally free ferrite. After the passed tonnage of 691.8 million gross tones this state is preserved only at a depth of more than 10 mm. A distinctive feature of the structure at this distance is a large number of bending extinction contours, which reveals elastoplastic distortions of the crystal lattice in the material. Stress concentrators of the steel under study are intra- and interphase interfaces of grains of ferrite and perlite, cementite plates and ferrite of perlite colonies, globular cementite particles and ferrite. The transformation of the structure is manifested at the macro level in the formation of microcracks at an acute angle to the surface to a depth up to 140 μm , and in the formation of the decarburized layer. At the micro level, the formation of elastoplastic stress fields and the destruction of cementite plates of perlite colonies have been revealed. It is shown that stress concentrators are intra- and interphase interfaces of ferrite and perlite grains, cementite and ferrite plates of ferrite colonies, globular cementite particles and ferrite. In the grains of structurally free ferrite, the formation of nano-sized particles of cementite was observed. The comparison is made with the results of the evolution of structural-phase states in the fillet of volume-hardened rails after the passed tonnage of 500 million gross tones: the most significant transformations of structural-phase states are observed in the surface layers. The evolution of the structural-phase state of perlite of lamellar morphology consists in the dissolution of cementite plates, which leads to the formation of a chain of particles of the carbide phase with globular shape in place of the cementite plate. This is possible due to the transfer of carbon atoms from the crystalline lattice of cementite to dislocations.

Keywords: differentially hardened rails, structure, phase composition, long-term operation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-826-830

REFERENCES

- Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. *Microstructure of gradient rails. Carbide*. CISP Ltd, 2016, 153 p.
- Sheinman E. Wear of rails. *J. of Friction and Wear*. 2012, vol. 33, no. 4, pp. 308–314.
- Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels. *Steel Tech*. 2008, vol. 3, no. 1, pp. 19–23.
- Ivanisenko Yu., Maclaren, I., Sauvage, X., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe–C composite. *Acta Mater*. 2006, vol. 54, pp. 1659–1669.
- Ning Jiang-Li, Courtois-Manara E., Kurmanaeva I., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kübel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion. *Mater. Sci. Eng. A*. 2013, vol. 581, pp. 8–15.
- Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlite steel due to plastic deformation. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003, vol. 345, pp. 81–89.
- Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S, Goto S, Raabe D, Kirchheim R: Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite. *Acta Mater*. 2011, vol. 59, pp. 3965–3977.
- Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires. *Scripta Mater*. 2001, vol. 45, pp. 1469–1472.
- Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R., Pashley D.W., Whelan M.J. *The electron microscopy of thin crystals*. Butterworths, 1965, 549 p.
- (Russ.ed.: Hirsh P., Hovi R., Nicholson R. *Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov*. Moscow: Mir, 1968, 574 p.).
- Brandon David G., Kaplan Wayne D. *Microstructural characterization of materials*. Chichester, New York, 1999. (Russ.ed.: Brandon D., Kaplan W. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya*. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 384 p.).
- Utevskii L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metalovedenii* [Diffraction electron microscopy in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 584 p. (In Russ.).
- Tomas Gareth, Goringe Michael J. *Transmission electron microscopy of materials*. New York-Chichester-Brisbane-Toronto, John Wiley Sons, 1979, 320 p. (Russ.ed.: Tomas G., Goringe M. *Prosvetchivayushchaya elektronnaya mikroskopiya materialov*. Moscow: Nauka, 1983, 320 p.).
- Ray F. Egerton. *Physical principles of electron microscopy. An introduction to TEM, SEM, and AEM*. Berlin: Springer Science+Business Media, Inc, 2005, 211 p.
- The transmission electron microscope*. Khan Maaz ed. ITAvE, 2016, 391 p.
- C. Barry Carter, David B. *Transmission electron microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
- Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V. *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of solids deformation]. Novosibirsk: Nauka, 1985, 229 p. (In Russ.).
- Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaeva K.V., Semina O.A. Surface layer structure degradation of rails in prolonged operation. *Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2015, vol. 9, no. 6, pp. 1292–1298.
- Ivanov V.E., Ivanov Yu.F., Peregudov O.A., Morozov K.V., Wang X.L., Dai W.B., Ponomareva Yu.V., Semina O.A. Evolution of structure and properties of railhead fillet in long-term operation. *Materials and Electronics Engineering*. 2015, vol. 2, no. 4, pp. 1–4.
- Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Semina O.A. Long-term operation of rail steel: degradation of structure and properties of surface layer. *Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron techniques*. 2016, vol. 10, no. 5, pp. 1101–1105.
- Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Gromov V.E. Degradation of rail-steel structure and properties of the surface layer. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 8, pp. 567–570.

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 15-12-00010. The research was carried out by Prof. Yu.F. Ivanov on the equipment of the Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk). The authors thank Ye.V. Polevoi for samples and macrostructure analysis.

Information about the authors:

A.A. Yur'ev, Research Engineer of Department of Scientific Research (ant-yurev@yandex.ru)
V.E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor; Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)
K.V. Morozov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Rolling Production (morozov_kv75@mail.ru)
O.A. Peregudov, Assistant to the Rector for Youth Policy (olegomgtu@mail.ru)

Received May 25, 2017